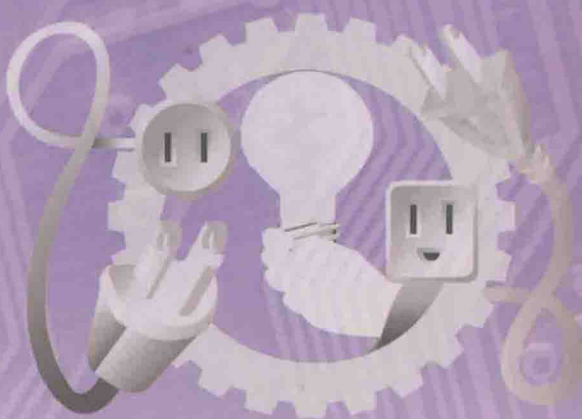


工科高等院校电路系列课程教材

电路分析基础

DIANLU FENXI JICHU

上官右黎 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

电路分析基础

上官右黎 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本教材是根据目前电子电路技术的发展和教学的需求而编写的。全书共分十三章,前十章为基本内容,介绍了基本定律,基本变量和基本元件,电路的等级变换,电路的瞬态分析,正弦稳态电路分析,互感元件与理想变压器,电路的频率特性和谐振电路等;后三章内容为有源元件简介,矩阵分析和简单非线性电阻电路,供选学。

本书内容系统完整,覆盖了教学大纲要求的全部内容,并讨论了现代电路理论中的一些重要概念,适度地引入了学习本课程的学生能接受的少量前沿内容,选材具有一定的前瞻性。书中例题丰富,且配有难易适度的习题,有助于开拓读者的思路。

本书可作为通信、电子、计算机、自控等专业大学电路基础课教材,也可供自学电路课程的读者作为自修读物。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/上官右黎编著. —北京:北京邮电大学出版社,2003

ISBN 7-5635-0670-5

I . 电... II . 上... III . 电路分析—高等学校—教材 IV . TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 045258 号

书 名: 电路分析基础

作 者: 上官右黎

责任编辑: 刘 洋

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张: 22.25

字 数: 551 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

ISBN7-5635-0670-5/TN-241

定价:32.00 元

·如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系·

编者的话

电路分析基础是电子电路系列课程的第一门基础课,如何适应教学改革形势,是大家关心的事情。近几年笔者参加了有关电子电路系列课程的学术研讨会,同行们的意见基本一致,认为电路分析基础课程的基本内容和范围大体上已趋稳定。但是,科学技术的发展引起了新知识的急剧膨胀,我们的教学观念也要作相应的调整:学习者要由被动学习转化到更多的主动学习,教学者要做学习过程的引导者、促进者、支持者。“工欲善其事,必先利其器”,一本好的教材便是学习者最重要的工具之一,编写本教材的目的就是为了适应这一需求。

本教材覆盖了教学大纲要求的全部内容,并讨论了现代电路理论中的一些重要概念,适度地引入了学习本课程的学生能接受的少量前沿内容,选材具有一定的前瞻性。

本教材在结构上做了调整,基本内容放在前十章,后三章内容选用。每章的基本内容放在前面几节,后面节次内容可选用。例如“运算放大器”是否需要在本课程中讲以及怎么讲,一直是有争议的,这里将它与负转换器、回转器编在第十一章“有源元件简介”中,学生经过了前面内容的学习,再从有源元件的角度来学习运算放大器,一定可以避免许多理解上的困难。本书结构上的安排有利于适应不同专业对学时的要求。

1. 学习全部内容需要 72~80 学时;

2. 学习前十章内容需要 60~68 学时;

3. 学习前十章内容“适当略讲”可适用于 51 学时。(例如第六章二阶电路、第七章三相电路、第九章复杂谐振电路略讲,其中每章习题中最后 2~3 道习题可以不作要求。)

为了有利于读者自学,力求论述深入浅出,简明扼要地揭露事物的本质。引导读者理解在集总参数假设下,以基尔霍夫定律为依据引出的一系列分析方法,舍去一些不常用的等效方法和一些复杂的推导过程。但是为了有利于培养学生的抽象思维的能力、逻辑推理的能力,以及掌握一些特有的分析方法,保留一部分定理的证明过程,并引用比较现代的证明方法。

为了保持面向通信学科的特色,在编写第九章“电路的频率特性”时,特别注意与“电子电路基础”课程的关系,要求在内容选材和论述中与电子电路基础相关内容确保不矛盾、尽量不重复,并能够相辅相成。

为了每个重要的知识点都有练习,本书例题和习题丰富,由浅入深,便于选用。

本书从构思到完成经历了两年的时间。在此期间,霍锡真教授对全书的结构和内容提出了重要的意见,并参与了部分内容的编写,电子工程学院“信号、电路与系统”教研室的老师们对本书内容提出了宝贵的意见,部分老师参加了编写工作。另外我校教材委员会主任赵尔源教授,电信工程学院著名专家谢沅清教授、解月珍教授对本教材颇为关心,并提出了重要意见。在此一并向他们表示由衷的感谢。

此外,笔者已经编写了《电路分析基础解题指南》一书,于 2001 年初由北京邮电大学出版社出版,另有“电路分析辅导与自测”软件光盘也已出版(在 2002 年教育部组织的“全国多媒体课件大赛”中获三等奖),可以配套使用。

我的学生杜蓬勃、温季睿和上官思楠参加了教材电子版的录入工作和习题的校对工作,在此向他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中难免有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2003 年 5 月于北京

目 录

第一章 电路模型和基尔霍夫定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路分析的基本变量	3
1.3 基尔霍夫定律	7
1.4 图的概念和定律方程的独立性	12
习题一	17
第二章 电路元件与电路的等效变换	21
2.1 电阻元件	21
2.2 电容元件	23
2.3 电感元件	25
2.4 电阻网络的等效变换	28
2.5 独立电源及其等效变换	33
2.6 受控源及含受控源电路的等效变换	39
2.7 对偶特性	42
习题二	43
第三章 线性电路的一般分析方法	49
3.1 支路电流法	49
3.2 节点分析法	50
3.3 网孔分析法	54
3.4 割集分析法与回路分析法	59
习题三	62
第四章 电路定理	65
4.1 叠加定理	65
4.2 替代定理	68
4.3 戴维南定理和诺顿定理	69
4.4 特勒根定理	76
4.5 互易定理	80
习题四	83
第五章 一阶电路的瞬态分析	87
5.1 动态电路及其方程	87
5.2 一阶电路的零输入响应	92
5.3 一阶电路的零状态响应和全响应	96
5.4 三要素法求一阶电路的响应	101
5.5 微分电路与积分电路	106

5.6 指数信号与正弦信号作用于一阶电路	111
5.7 突变现象简介	113
习题五	118
第六章 二阶电路与状态变量方程	126
6.1 RLC 电路的零输入响应	126
6.2 RLC 电路的零状态响应和全响应	134
6.3 状态变量和状态方程	138
习题六	143
第七章 正弦稳态电路的分析	147
7.1 正弦信号	147
7.2 电路与电路定律的相量模型	152
7.3 阻抗和导纳	157
7.4 正弦稳态电路的分析计算	161
7.5 正弦稳态电路的功率	164
7.6 最大功率传输	168
7.7 三相电路的基本概念	173
7.8 多频率正弦稳态电路分析	180
习题七	183
第八章 耦合电感与理想变压器	191
8.1 耦合电感及其伏安关系	191
8.2 耦合电感的等效电路	196
8.3 含耦合电感的电路分析	202
8.4 理想变压器及其特性	205
8.5 含理想变压器的电路分析	209
8.6 全耦合变压器	212
8.7 实际变压器的电路模型	214
习题八	216
第九章 电路的频率特性	222
9.1 RC 电路的频率特性	223
9.2 串联谐振电路	227
9.3 并联谐振电路	235
9.4 复杂并联谐振电路	239
习题九	246
第十章 双口网络	251
10.1 双口网络方程和参数	251
10.2 双口网络参数间的相互换算	256
10.3 双口网络的等效电路	257
10.4 双口网络的特性阻抗和传输常数	259
10.5 双口网络的联接	262

习题十	264
第十一章 有源元件简介	269
11.1 理想运算放大器	269
11.2 负转换器	273
11.3 回转器	276
习题十一	281
第十二章 电路的矩阵分析	284
12.1 基尔霍夫定律的矩阵形式	284
12.2 节点分析	286
12.3 改进的节点分析	290
12.4 回路分析	293
习题十二	297
第十三章 简单非线性电阻电路	300
13.1 非线性电阻电路的基本概念	300
13.2 非线性电阻串联、并联与混联	302
13.3 图解法	304
13.4 小信号分析	308
习题十三	310
附录 A 复数的表示与运算	314
附录 B 复变函数的几个定理	316
附录 C 实际元件模型的构成	317
附录 D 磁路的概念	320
附录 E 线性时变电路的概念	325
部分习题答案	333
参考文献	346

第一章 电路模型和基尔霍夫定律

电路理论是研究电路中所存在的普遍规律的理论。它在现代通信技术、电子学、自动控制技术等学科中是一门基础学科,占有重要地位。

电路理论可分为两大主干内容:一是电路分析,主要内容是在给定电路结构、元件参数的条件下,寻求电路输入信号与输出信号之间的关系;二是电路综合,主要研究在给定输入信号和输出信号即电路传输特性的条件下,寻求电路的结构和参数。很明显,必须首先学习电路分析,也可以说电路分析是电路理论的基础。

1.1 电路和电路模型

实际电路总是为了实现某种功能而设计和制作的。电路的一种重要功能就是伴随电流在电路中流动,实现电能的传输、分配和储存,并进行能量的转换。所以,电路可看成由电源、负载、联接导线和控制四个部分组成。其中电源将化学能、机械能等非电能转换成电能为电路提供能量,负载吸收电能并储存起来或者转换成非电能,联接导线起着传输和分配能量的作用,控制部分则对电路的各个部分按人们的设计进行控制。例如最简单的手电筒电路,如图 1-1(a)中各部分是按实际元件画出的,图(b)则是按电路符号画出,称为电路模型。在这里电池作为电压源为电路提供能量,灯泡作为负载可以用电阻来表示,开关控制着电路工作与否,导线起着传输能量的作用。

在通信、自动控制以及计算机等电子设备中,为了对电信号进行处理,需要采用不同类型的电路来完成各种任务。在这些设备中,电路的一个重要功能就是将输入信号(也称为激励)经过变换,处理成为所需要的输出信号(也称为响应)。

例如,图 1-2 画出的是收音机的功能框图,由图可见,一台简单的收音机是由输入电路(包括天线及调谐电路)、检波电路、放大电路、扬声器以及电源电路组成。输入电路的功能

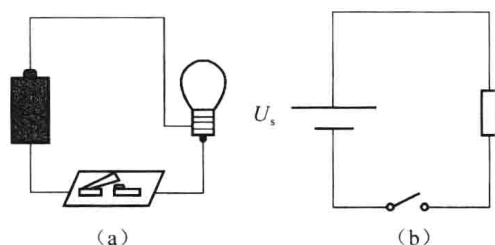


图 1-1 手电筒电路

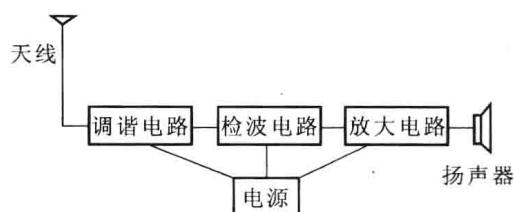


图 1-2 收音机功能框图

是接收由各个广播发射台发出的不同信号,并从中选择出所需要的信号;检波电路的功能是

将调谐电路选择出来的高频信号做适当的处理,从中取出广播台所传送的音频信号和除去其他不需要的信号;由于音频信号很微弱,因此在送入扬声器之前,还需要经过放大电路加以放大;扬声器则是将电能转换成声能;电源电路的功能是为各部分电路的工作提供能量。

从以上两个例子,可以对电路的功能有所了解。

图 1-1(b)是手电筒电路的电路模型。在电路分析课程中一般都是用电路模型来表示电路:在一定的条件下,对实际元件加以近似、理想化,即用一个表征其主要物理特性的理想元件模型来代替它。例如用电阻元件(R)表示某些部件将电能转化成其他形式的能量(如光能、热能、机械能等)的特征,并统一表示为吸收电能的特征;用电感元件(L)表示某些部件储存磁场能量的特征,称为理想电感;用电容元件(C)表示某些部件储存电场能量的特征,称为理想电容;用电压源(u_s)表示电池、发电机等为电路提供稳定电压的特性;用电流源(i_s)表示光电池等为电路提供稳定电流的特性。这几个理想元件的电路符号如图 1-3 所示。用理想元件构成的电路称电路模型。今后所提到的电路,除特别指明外,均指电路模型。

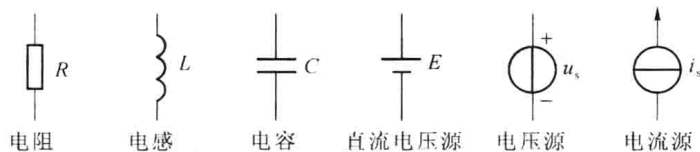


图 1-3 几个理想元件的电路符号

实际器件与理想电路模型是有区别的,例如在电路模型中,元件之间的连接线被认为是没有电阻的,而实际上导线总有一点电阻;在工作时两根导线之间还可能产生分布电容;一个实际电感除了储存磁场能量的特性外,它的消耗能量的特性也是不可忽略的。因此在必要时,也可以用几个理想元件的组合来表示一个实际元件。这些知识以后将逐步介绍。

这里假设的理想元件是抽象的模型,它们没有体积的大小,其特性集中在空间一点上,称为集总参数元件。由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。这种集总参数的假设是有条件的,即电路的尺寸 l 远小于外加激励信号的波长 λ ,即

$$l \ll \lambda$$

而波长与频率的关系为

$$\lambda = C/f$$

其中 $C = 3 \times 10^8$ m/s(光速)。

例如日常供电系统输出交流电的正弦波频率 f 为 50 Hz,其波长 λ 为 6000 km,对于普通实验室的设备来说是符合集总参数条件的,而对于远距离的电力输电线则不满足集总参数的条件。又如若微波信号频率 f 为 2000 MHz,其波长 λ 为 0.15 m,显然对于普通实验设备也不满足集总参数的条件;这时就不能用集总参数的概念,而应当采用分布参数或电磁场理论等其他领域的理论来分析电路。

当满足集总参数假设的条件时,在外加信号发生变化瞬间,激励产生的效应已经到达整个电路。可以认为,电效应在电路的所有部分同时发生,因此集总参数假设又被称为同时性公设。集总参数电路的概念意味着电效应的传播速度为无限大。

电路分析是在集总假设前提下,讨论电路中的基本定律、定理及求解电路的分析方法。

在实际电路的分析中用到这些定律与分析方法时一定要注意它的工作条件。

在集总参数电路的前提下,还需要将电路加以分类。

当元件的参数与工作条件无关,即元件参数是常数时,称为线性元件。非线性元件的元件参数则随工作条件的变化而不同。例如电阻元件的电阻值不随其工作电压或电流的变化而改变,称为线性电阻。而晶体二极管是非线性电阻,它的电阻随着工作电压的变化而变化,称为非线性电阻。由线性元件组成的电路称为线性电路。电路中只要含有一个非线性元件,电路就属于非线性电路,对它的分析方法与线性电路有很大的区别,第十三章将简单介绍非线性电阻电路的基础知识。

当元件参数与时间无关时(电源除外),称为时不变元件,否则称为时变元件。由时不变元件组成的电路称为时不变电路。电路中只要含有一个时变元件,电路就属于时变电路。附录 E 将简单介绍由时变元件组成的时变电路。

电路分析基础研究的主要是集总参数假设下的线性时不变电路。

此外,在电路理论中经常用到网络这个名称,在电路分析中,网络的含义与电路相同,都是指一些元件的相互联接。

1.2 电路分析的基本变量

电路由支路和节点构成。在电源激励下,支路中有电荷移动形成电流,节点之间有确定的电压。电路分析就是在给定电路结构、元件参数和激励的情况下计算电路中的电流、电压与功率,所以把支路电流和支路电压等称为电路分析的变量。

1.2.1 电流

电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷。电荷量(也称电量)的单位是库仑(简称库,用字母 C 表示), 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于 1 库仑,用 q (或 Q) 表示电量。带电粒子有规则的移动便形成电流。如图 1-4 所示。

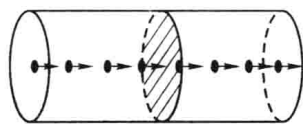


图 1-4 电荷的流动

1. 电流的定义

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称为电流。用字母 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

也可以说电流反映了电荷对于时间的变化率。

2. 电流的方向

正电荷移动的方向定义为电流的方向。实际上支路的电流是带有负电荷的电子流,但习惯上把正电荷移动的方向定义为电流的方向。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流称为直流电流,可以用 I (或 i) 表示,这时电流与电荷的关系表示为 $I = Q/T$ 。如果电流的大小和方向都随时间变化,则这种电流称为交变电流(简称交流),用 $i(t)$ 表示,或简写为 i 。

3. 电流的参考方向

在单个电源作用于电路时,可以直接判断出电流的方向,但是当多个电源同时作用于较复杂的电路时,未经计算就难以直接判断出各电流的方向。如图 1-5 中,无法直接判断 R_2

支路电流的方向。所以在分析电路时首先假设支路电流的一个方向,这个任意假设的方向称为电流的参考方向,在支路中用箭头表示如图 1-6 所示。或用双下标表示,如 a、b 端之间的电流可表示为 i_{ab} ,表示从 a 端流向 b 端的电流,并有 $i_{ba} = -i_{ab}$ 。

利用电流的参考方向来计算电路,计算结果若是正的,说明电流的参考方向与真实方向一致。计算结果若是负的,说明电流的参考方向与真实方向相反,但并不需要改变电流的参考方向,而是以标出的参考方向与电流的正负号结合起来表示电流的真实方向。所以参考方向一经设定,在计算过程中不再改变。这种表示方法对于交变电流同样是非常重要和有效的。交变电流 $i(t)$ 是时间的函数,它的大小与方向随时间而变化,它的正值或负值都是相对于参考方向而言的。换言之,如果某支路电流未标明参考方向,则电流的正负值失去了参照方向,也就失去了实际意义。

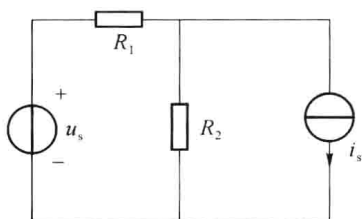


图 1-5 两个电源作用于电路

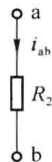


图 1-6 电流的参考方向

4. 电流的单位

电流的单位为安培(简称安,用字母 A 表示),常用单位还有毫安(mA),微安(μA)等。这时电荷的单位为库仑;时间的单位为秒(用字母 s 表示)。

$$1 \text{ 安培} = \frac{1 \text{ 库仑}}{1 \text{ 秒}}$$

1.2.2 电压

如果电荷通过某支路,支路两端存在电位差,电荷与支路之间会发生电能的交换,若支路的 a 端电位高于 b 端电位,单位正电荷从 a 端移到 b 端,电场力作功,电荷失去电位能,这部分能量被支路所吸收(例如图 1-7 所示右侧电阻支路);当单位正电荷从 b 端移到 a 端即从低电位端移到高电位端,必然要由外力做功,而电荷获得电位能(例如图 1-7 所示左侧电源支路)。

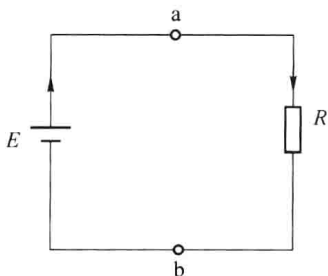


图 1-7 电压的概念

1. 电压的定义

电路中两点间的电压就是两点间的电位差,数值上等于单位正电荷从高电位点移动到低电位点时,电场力所做的功,用符号 u 表示:

$$u = \frac{dw}{dq}$$

上式表明,单位正电荷从 a 端移到 b 端由电场力作功时电压 u 为正值;若由外力做功则电压 u 为负值。由此可见,电压也是一个代数量。

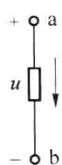
2. 电压的极性

电压的极性是高电位端到低电位端。如果电压的大小和方向不随时间变化,则这种电

压称为直流电压,可以用 U 或 u 表示。如果电压的大小和方向都随时间变化,则这种电压称为交变电压,用 $u(t)$ 表示,或简写为 u 。

3. 电压的参考极性

与支路电流需要设定其参考方向一样,对于支路电压,也需要设定其参考极性。在电路



图中“+”表示高电位端,“-”表示低电位端;也可以用箭头表示,箭头指向电压(电位降)的方向,如图 1-8 所示;或用双下标表示,如 a, b 端之间的电压可表示为 u_{ab} ,表示从 a 端至 b 端的电压,并有 $u_{ba} = -u_{ab}$ 。

用设定的参考极性去计算电压,计算结果若是正的,说明电压的参考极性与真实极性一致。计算结果若是负的,说明电压的参考极性与真实极性相反。若没有设定参考极性,则电压的正负值毫无意义。

图 1-8 电压的极性

4. 电压的单位

电压的单位为伏特(简称伏,用字母 V 表示);常用单位还有毫伏(mV),千伏(kV)等。这时能量的单位为焦耳(用字母 J 表示),电荷的单位为库仑。

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 库仑}}$$

5. 参考点、电位与电压

在分析电路时,为了方便,可以任意设置电路的参考点,参考点即电路的零电位点,但一个电路只能设置一个参考点。当设定电路中某一点为参考点,则电路中各点的电压也就是该点到参考点的电位差。参考点、电位与电压有以下关系:

- (1) 各点的电位随参考点设定的不同而不同;
- (2) 两点间的电压与参考点的设置无关。

通过后面例 1-6 的学习将有助于进一步理解这些概念。

1.2.3 电流与电压的关联参考方向

前面谈到,支路电流的参考方向与支路电压的参考极性是可以任意选定的,元件上电压、电流参考方向设定的不同,会影响到计算公式的正负号。但为了分析上的便利,常常将同一支路的电流与电压的参考方向选为一致,即电流的参考方向由电压参考极性的“+”端指向“-”端,如图 1-9(a)所示,这种方式称为电流与电压在关联参考方向下。这个概念非常重要,在大多数情况下,支路的电流与电压是否是关联参考方向将影响到支路的伏安特性,这一点以后会逐步介绍。当电压与电流为关联参考方向时,可以只标出一个变量的参考方向如图 1-9(b)所示,非关联参考方向时必须全部标出,如图 1-9(c)所示。

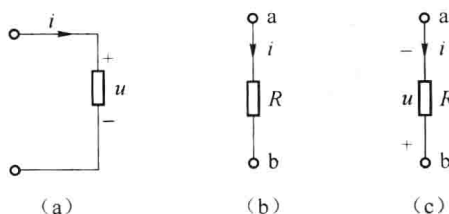


图 1-9 电压与电流的关系参考方向

例 1-1 请写出图 1-9(b)、(c)所示电阻的电压与电流的关系(简称伏安关系)。

解 图(b) $u = Ri$ (电压与电流在关联方向下、欧姆定律);

图(c) $u = -Ri$ (电压与电流在非关联方向下)。

1.2.4 功率与能量

在电路的分析与计算中,研究能量的分配和交换是重要内容之一,特别是功率可直接反映出支路的能量变化情况。用 w 表示能量,用 p 表示功率。

1. 功率的定义

单位时间内电路所吸收的电能,称作这部分电路吸收的功率。

$$p = \frac{dw}{dt}$$

上式可理解为功率是能量对时间的变化率,若随着时间的变化能量是增加的,则功率是正的,表示电路吸收(或消耗)能量,例如电阻支路;若随着时间的变化能量是减少的,则功率是负的,表示电路供出(或产生)能量,例如电源支路。

2. 功率的计算

由定义式可知

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i$$

从上式的结果我们发现,功率可以用电流与电压的乘积来计算,即当支路的电流与电压在关联参考方向下,电流与电压的乘积就是此支路吸收的功率。计算结果为正时,说明支路吸收功率;计算结果为负时,说明支路供出功率。这种讨论方式完全符合功率的定义,并且便于理解和记忆。需要说明的是,有的书上有不同的讨论方式,但其实质是一样的。当支路的电流与电压在非关联参考方向时,计算公式要加负号。

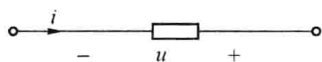
$$p = -ui$$

3. 功率的单位

功率的单位为瓦特(简称瓦,用字母 W 表示),常用单位还有毫瓦(mW),千瓦(kW)等。这时能量的单位为焦耳,时间的单位为秒,电压的单位为伏特,电流单位为安培。

$$1 \text{ 瓦特} = \frac{1 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 秒}}$$

例 1-2 已知图1-10中支路电流 $i = 1 \text{ A}$,电压 $u = 3 \text{ V}$,求吸收功率 p 。



解 电压与电流在非关联参考方向下

$$p = -ui = -3 \text{ W}$$

吸收功率(-3 W),或供出功率 3 W 。

图 1-10 例 1-2 图

例 1-3 已知图1-11中电压源支路,电流 $i = -2 \text{ A}$,电压 $u = 3 \text{ V}$,求功率 p ,并说明支路是否吸收功率。

解 电压电流在关联参考方向下,支路的吸收功率为

$$p = ui = 3 \times (-2) = -6 \text{ W}$$

所以支路不是吸收功率而是供出功率 6 W 。

例 1-4 已知支路电压电流参考方向如图1-12所示。若 $u = -200 \text{ V}$,元件吸收功率 $p = 12 \text{ kW}$,求支路电流 i 。

解 电压电流在关联参考方向下,已知元件吸收功率,利用公式

$$i = \frac{p}{u} = \frac{12 \times 10^3}{-200} = -60 \text{ A}$$

即支路电流 i 为 -60 A 。

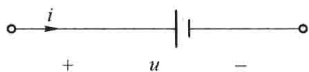


图 1-11 例 1-3 图

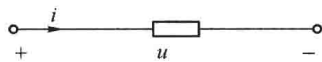


图 1-12 例 1-4 图

1.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫(或译为克希荷夫)提出了集总参数电路的基本定律,称之为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律,即基尔霍夫定律是集总参数假设下电路基本定律。

先介绍几个名词和术语。

1. 支路和节点

一般情况下电路中一个二端元件称为一条支路,元件的汇接点称为节点,如图 1-13 中点 a、b、c、d,这里共有 5 条支路,4 个节点。

为了方便,也可以把支路定义为多个元件串联而成的一段电路,如图 1-13 中 1 和 3 元件的串联作为一条支路,2 和 5 元件的串联也作为一条支路,节点定义为 3 条或 3 条以上支路的汇接点,如 b 点和 d 点,而 a 点和 c 点就不再是节点。这样定义支路和节点,显然比前面的定义在支路和节点的数量上要减少,对分析电路和解题是方便的。

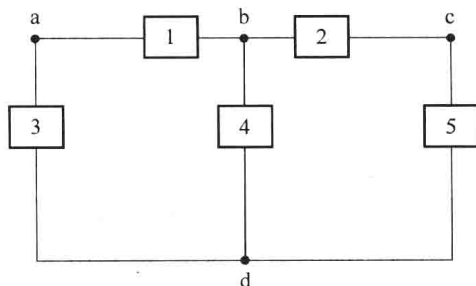


图 1-13 支路与节点

2. 回路

电路中任一闭合的路径称为回路,如图 1-13

中由 a-b-d 回到点 a,由 b-c-d 回到 b,由 a-b-c-d 回到 a,都是回路。

3. 网孔

网孔的定义是对平面电路而言的,图 1-13 是平面电路,其中内部不含支路的回路称为网孔。上面 3 个回路中前两个符合网孔定义,显然第 3 个不符合网孔定义,因为内部含有元件 4 的支路。

在集总参数电路中,任何时刻通过元件的电流和元件两端的电压都是可确定的物理量。通常把通过元件的电流称支路电流,元件的端电压称支路电压,它们是电路分析的对象,集总参数电路的基本规律也用它们来表示。

1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

电流定律也叫基尔霍夫第一定律,它反映了电路的节点上各支路电流之间必须遵循的规律。

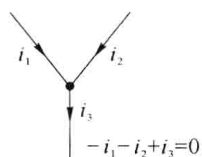
定律内容:在任一时刻,电路的任一节点,流出某节点的所有支路电流代数和为零。其数学表示式为

$$\sum_{k=1}^{m_0} i_k = 0$$

式中, i_k 为流出(或流入)节点的第 k 条支路电流, m_0 为与节点相联的支路数。

图 1-14 中画出的是电路中的某一节点, 连接了 3 条支路, 并标出了电流的参考方向。若以流出节点电流为正, 则写出 KCL 方程

$$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$$



将上式写为

$$i_3 = i_1 + i_2$$

上式左边是流出节点的电流, 右边是流入节点的电流。

电流定律也可表示为: 在任一时刻, 电路的任一节点, 流入该节点的支路电流之和等于流出该节点的电流之和。

图 1-14 电流定律

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}}$$

电流定律的理论依据是电荷守恒原理, 即电荷既不能创造也不能消灭, 流进节点的电荷一定等于流出节点的电荷, 因为在集总参数假设中, 节点只是支路的汇接点, 不可能积累电荷。KCL 说明了电流的连续性。

在以上的讨论中, 并没有涉及到支路的元件, 这就是说, 不论支路中是什么元件, 只要联接在同一个节点上, 其支路电流就按 KCL 互相制约。换言之, KCL 与支路元件性质无关而与电路结构有关。

KCL 原是运用于节点的, 也可以把它推广运用于电路中的任一假设的封闭曲面。例如, 在图 1-15 中虚线所示封闭面, 流入或流出封闭面的电流有 i_1 、 i_2 、 i_3 , 根据标出的参考方向, 以流出封闭面的电流为正, 可列出 KCL 方程式

$$-i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

例 1-5 求图 1-16 所示电路中电流 i_1 和 i_3 的值。

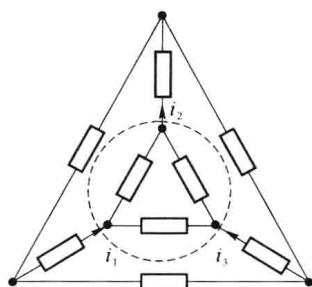


图 1-15 封闭面的 KCL

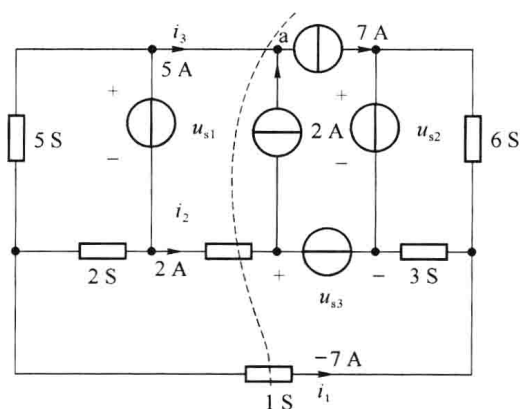


图 1-16 例 1-5 电路

解 (1) 由 a 节点的 KCL 列出方程

$$i_3 + 2 = 7$$

$$i_3 = 5 \text{ A}$$

(2) 作封闭面如图中虚线,可列出

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$i_1 = -7 \text{ A}$$

1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

电压定律也叫基尔霍夫第二定律,它表明电路的闭合回路中,各支路电压之间的制约关系。

定律内容:在任一时刻,电路的任一回路,沿该回路的所有支路电压的代数和为零。

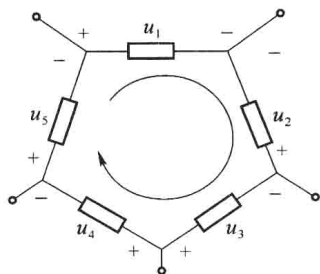
$$\sum_{k=1}^{n_0} u_k = 0$$

式中, u_k 为该回路中第 k 条支路电压, n_0 为回路包含的支路数。

这一定律也可以表述为:在任一时刻,电路的任一回路,沿该回路的支路的电位升等于电位降。

$$\sum u_{\text{升}} = \sum u_{\text{降}}$$

图 1-17 中画出的是电路中的某一回路,连接了 5 条支路,并标出了各支路电压的参考极性。任意选定回路的绕行方向,例如图画出的顺时针方向,支路电压的参考极性与回路绕行方向一致的取正号,支路电压参考极性与回路绕行方向相反的取负号。可列写 KVL 方程



或

$$u_1 - u_2 - u_3 + u_4 + u_5 = 0$$

$$u_1 + u_4 + u_5 = u_2 + u_3$$

和。

上式左端为回路中电位降之和,右端为回路中电位升之和。

基尔霍夫电压定律是能量守恒的体现。按照能量守恒定律,单位正电荷沿回路绕行一周,所获得的能量必须等于所失去的能量,单位正电荷在从高电位向低电位移动过程中失去能量,在从低电位向高电位移动过程中获得能量,所以在闭合回路中电位升必然等于电位降,即一个闭合回路中各支路电压的代数和为零。

在以上的讨论中,并没有涉及到支路的元件,这就是说,不论支路中是什么元件,只要连接在同一个回路中,其支路电压就按 KVL 互相制约。换言之,KVL 与支路元件性质无关而与电路结构有关。

总之,KCL、KVL 是电荷守恒原理和能量守恒原理在集总参数电路中的体现,KCL、KVL 只与电路的拓扑(结构)有关,而与各支路连接的元件的性质无关。无论是电阻、电容、电感还是电源,甚至是非线性元件或时变元件等。

例 1-6 电路如图 1-18 所示,选 d 点为参考点,求 u_a, u_{ac} 的值。若选 b 点为参考点,求 u_a, u_{ac} , 比较结果,可得出什么结论?

解 (1) 选 d 点为参考点,即 $u_d = 0$, 因 cd 支路电流 $i_1 = 0$, 1Ω 电阻上没有电压,所以 $u_c = 20 \text{ V}$ 。

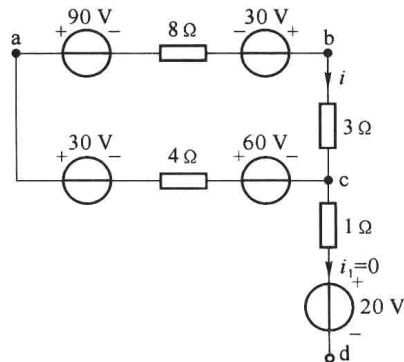


图 1-18 例 1-6 电路